Re-Digitalisierung der Dosimetrie

Der Duden kennt 3 Bedeutungen für den Begriff „digital", die allesamt eng miteinander verknüpft sind und aufeinander aufbauen.
Der Finger – „Digitus" – erlaubt das Abzählen von Einheiten innerhalb von Prozessen, die „in Einzelschritten aufgelöst"/„in Stufen erfolgend" vonstattengehen.
Dies ist auch die zugrunde liegende Arbeitsweise von Rechentechnik, deren komplexer Einsatz zu der Entwicklung führt, die langläufig als „Digitalisierung" bezeichnet wird.
Dieser letzte Begriff wird assoziiert mit „smarten", vernetzten Messgeräten, die auch in der Dosimetrie Daten besser zugänglich machen und darstellen sollen. Dieser Prozess hat nur einen Mehrwert, wenn dadurch zusätzliche Informationen gewonnen oder bereitgestellt werden. Dosis und Messprozess (-metrie) sind immer im ursprünglichen Sinne digital. Jede gemessene Dosis kommt durch die stochastische Wechselwirkung von einzelnen Teilchen des Strahlungsfeldes zustande.

Digitale Energiedepostion und ihr stochastischer Charakter

Insbesondere im Strahlenschutz wird mit kleinen Dosen umgegangen, bei denen der digitale – in Stufen erfolgende – Charakter wesentlich ist. Beispielsweise entsteht das Messsignal eines Berylliumoxid-Personendosimeters, das eine Dosis von 1 µGy im Feld einer ^{137}Cs-Quelle akkumuliert hat, im Mittel aus nur etwa 1.000 Wechselwirkungen mit Primärphotonen. Jede einzelne Wechselwirkung kann dabei isoliert von jeder anderen Wechselwirkung betrachtet werden, da die Photonen des Strahlungsfeldes in der Regel aus unterschiedlichen Kernumwandlungen stammen und auf ganz unterschiedlichen Wegen in den Detektor gelangt sind. Dies kennzeichnet einen Poisson-Prozess, für den gilt, dass die relative statistische Schwankung der Anzahl der elementaren Informationsträger (in diesem Beispiel die Anzahl der Wechselwirkungen) invers proportional zu ihrer Quadratwurzel ist. Erreicht diese Zahl mindestens 10.000, ist die relative Schwankung auf unter 1 Prozent gefallen und bleibt in vielen praktischen Fällen der Strahlenschutzmesstechnik hinter weiteren Unsicherheitsfaktoren verborgen. Daher wird in der Regel hier nicht der messtechnische Aufwand unternommen, um diese digitalen Einzelereignisse in ihrer Anzahl oder weiteren Eigenschaften, die jedes einzelne Ereignis charakterisieren, zu bewahren und zu analysieren.

Physikalische Signalentstehung als digitaler Prozess

Zählspektroskopische Systeme, die auch für die Identifikation von Strahlungsquellen bspw. im Homeland-Security-Sektor eingesetzt werden, müssen einzelne Ereignisse jedoch erfassen und mindestens in einer reduzierten Darstellung erhalten. Hierdurch werden sogenannte Pulshöhenhistogramme möglich, die einen Rückschluss über die Herkunft des Strahlungsfeldes zulassen. Technisch wird diese Information über eine (informationstechnische) „Digitalisierung" eines jeden Ereignisses erfasst.

Digitalisierung eines jeden Ereignisses

Stand der Technik in dieser Geräteklasse sind eine Abtastung eines jeden Detektorpulses im Abstand weniger Nanosekunden und die nachfolgende Reduktion auf wenige Eigenschaften dieses Ereignisses (Feature-Extraktion). Aber auch jedes einzelne Ereignis wiederum besteht aus einer diskreten – „digitalen" – Anzahl von elementaren Informationsträgern. Dies sind detektorabhängig die Zahl der Photoelektronen, Elektron-Loch-Paare oder freigesetzte Elektronen in einem Gasdetektor. Eine vollständig digitale Erfassung würde hypothetisch bedeuten, auch diese Zahl als solche digital zu erfassen.

Gerätetechnischer Erhalt der digitalen Eigenschaften

Dieser Schritt zwischen der Erfassung einer einzelnen Zahl (Dosis), die durch eine große Anzahl einzelner Schritte zustande kommt, und der Erfassung dieser einzelnen Schritte als solche kann als „Re-Digitalisierung" aufgefasst werden. Auch in Strahlenschutzmessgeräten bietet sich hier Potenzial in der Anwendung und wird – bedingt durch den technologischen Fortschritt im Bereich schneller, digitaler Bauteile – in den nächsten Jahren und Jahrzehnten Einzug in die Gerätewelt des Strahlenschutzes halten.

Welche Chancen bieten sich und welches Mehr an Information kann gewonnen werden?

Dies können Eigenschaften sein, die entweder das externe Strahlungsfeld betreffen oder den Messprozess selbst. In den handgehaltenen Spektrometern für die Nuklididentifikation und die Homeland-Security ist ein Treiber der Digitalisierung die Stabilisierung des Messgeräts, was nur auf Einzelereignisbasis sinnvoll möglich ist. Weiterhin erschließen

sich Korrelationen zwischen Ereignissen, z. B. im Falle gepulster Strahlungsquellen. Auch eine Verifikation des vorhergesagten statistischen Verhaltens bezüglich der erwarteten Poisson-Statistik ist möglich, wodurch das korrekte Funktionieren des Messgeräts hochsensitiv verifiziert werden kann. Eine messwertbezogene Anzeige der Unsicherheit kann ebenso berechnet werden und stellt für Sachverständige und Strahlenschutzbeauftragte einen eindeutigen Mehrwert dar.

Stabilisierung des Messgeräts

Re-Digitalisierung durch schnelle Abtastung

Gerätetechnisch konkret umgesetzt bedeutet „Re-Digitalisierung" oder digitale Erfassung immer eine Neu-Taktung eines asynchronen physikalischen Prozesses in einen synchronen Maschinentakt, mit dem das Signal eines Strahlungssensors abgetastet und als digitaler Wert weitergeleitet wird. Die Frequenz dieses Maschinentaktes muss sich, entsprechend dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, nach der Zeitskala des Prozesses richten, der abgebildet werden soll. Wollte man im Sinne einer maximalen, frühzeitigen digitalen Erfassung jedoch jedes einzelne Elektron einer Ladungsträgerwolke eines Gasdetektors oder jedes einzelne Photon eines Szintillationsdetektor-Pulses registrieren, geht dies nur mit absurd hohen Abtastfrequenzen im mehrstelligen GHz-Bereich oder mittels segmentierter Detektoren (z. B. Medipix o. Ä.).

Realistisch ist ein Digitalisierungsgrad, der sich an Bandbreite und Frequenz von verfügbaren Analog-Digital-Wandlern (Analog-Digital-Konverter, ADC) orientiert. Die Entwicklung von Strahlenschutzmessgeräten ist hier ein kleiner Markt, sodass auf Bauteile zurückgegriffen werden muss, die ursprünglich für andere Anwendungen entwickelt wurden. Profitieren kann man hier von Digitalisierung im Mobilfunkbereich, der immer schnellere, kompakte und stromsparende Analog-Digital-Wandler notwendig macht. Sinnvoll für die Anwendung in der Strahlungsmessung sind für viele Detektortypen Abtastraten von 100 MHz bis zu 1 GHz, die in Form von sogenannten Pipeline-ADCs erreicht werden, die eine Granularität der digitalen Werte von bis zu 16 Bit bieten. Frequenzen oberhalb von 250 MHz stellen jedoch auch hohe Anforderungen an die nachfolgende Auswertung, sodass man sich in vielen Fällen auf diesen Frequenzbereich beschränkt.

Abtastraten von 100 MHz bis zu 1 GHz

Anhand von 2 für den Strahlenschutz entwickelten Geräten wird diskutiert, wie eine volldigitale Erfassung einerseits aller zum Messsignal gehörenden elementaren Informationsträger und andererseits die volle Erfassung aller Wechselwirkungen umgesetzt sein kann und was dadurch gewonnen wird.

Einzelphotonen-OSL als Beispiel für digitale passive Dosimetrie

In der passiven (retrospektiven) Dosimetrie mittels „optisch stimulierter Lumineszenz" (OSL) in Berylliumoxid (BeO) findet eine Akkumulation, also Integration, der Dosis durch die Besetzung von metastabilen Haftstellen in der BeO-Keramik während der Bestrahlung statt. Dieses integrative Messsignal wird in Form von Lumineszenzlicht zugänglich, wenn das Material im Leseprozess durch Beleuchtung mit blauem Licht stimuliert wird.

Üblich ist eine Erfassung des Stroms an der Anode eines Sekundärelektronen-Vervielfachers, der in seinem Wert jede Mikrosekunde digital erfasst wird. Dies wird mit einem vergleichsweise langsamen ADC und einem Mikrocontroller umgesetzt. Dieser liefert ein Signal, das dem Lichtstrom proportional ist und der Zeitkonstante des BeO-Lumineszenzlichts mit 30 µs angemessen ist, d. h. das Abtasttheorem erfüllt. Jede Information über die stufenweise Entstehung der Dosis ist verloren durch die Akkumulation im BeO. Jedoch besteht das Lumineszenzlicht aus einzelnen, optischen Photonen.

Digitalisierung der OSL-Messung

Digitalisierung der OSL-Messung bedeutet in diesem Falle eine Erfassung dieses Lichts in seiner vollen Granularität. Eine Umsetzung dieses Messparadigmas ist in [1] beschrieben. Ein Einzelphotonensensor liefert zunächst analoge Spannungssignale, die geeignet sind, jedes einzelne Photoelektron nachzuweisen. Ein synchroner Systemtakt, in diesem Falle von 200 MHz, tas-

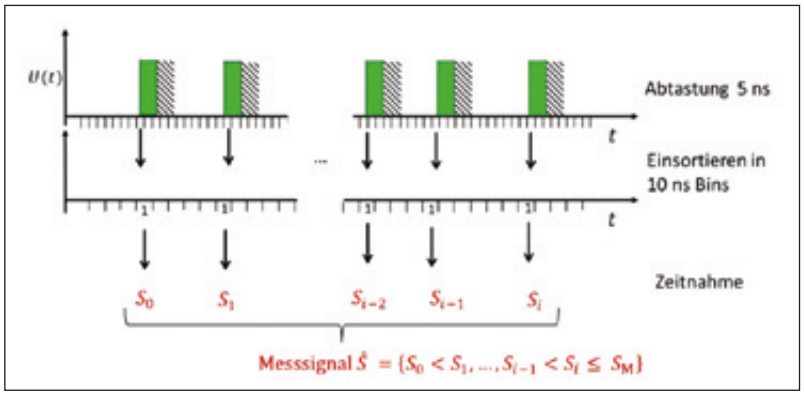

Abb. 1: Zuweisung von Zeitstempeln zu einem mit einem Bit digitalisierten Spannungssignal. Die Menge der Zeitstempel beinhaltet alle Informationen, die aus dieser Messung gewonnen werden können (J. Radtke, TU Dresden).

tet dieses Signal ab und weist jedem registrierten Photoelektron einen Zeitstempel zu (Abb. 1). Die Menge der Zeitstempel enthält alle zugänglichen Informationen aus dieser Messung.

Die Abtastung des Sensorsignals erzeugt in diesem Beispiel eine Datenrate von 200 MBit/s, die von einem integrierten Schaltkreis ausgewertet wird. Hier wird die Entscheidung getroffen, ob ein Photon registriert wurde. Diesem wird ein Zeitstempel von 4 Byte Länge zugewiesen. 1 mGy Dosis erzeugt in einem typischen Messsystem 1 Million optischer Photonen, die zu einem Messsignal führen. Damit bildet sich 1 mGy in einer 4 MByte großen Datenmenge ab.

Eine statistische Analyse erlaubt dabei eine Aussage über die Messunsicherheit einer einzelnen OSL-Messung, die für das jeweilige Dosimeter in Kombination mit dem Messgerät charakteristisch ist (Abb. 2). Keine Vermessung von Dosimeter-Ensembles auf verschiedenen Geräten ist für diese Angabe notwendig. Weiterhin kann eine periodische Stimulation verwendet werden, die auch der Menge der erfassten Zeitstempel eine Zeitstruktur aufprägt. Weitere Analyseverfahren wie Fourier-Transformation erlauben eine zusätzliche Erkennung von Störeffekten, die bei konventioneller Erfassung des Lichtstroms nicht erkannt werden können [1].

Aufgrund der vergleichsweise langen Abklingzeit des OSL-Lichts von BeO ist hier eine volldigitale Erfassung des vom Detektor stammenden Signals mit überschaubarem technologischem Aufwand möglich. Information über die Entstehung der Dosis ist jedoch unzugänglich, da diese nur integrativ zur Verfügung steht. In Bezug auf aktive Messsysteme wird die ereignisweise Digitalisierung anhand eines Dosisleistungsmessgeräts diskutiert, das mittels eines organischen Szintillators die Dosis bestimmt.

Schnelle Abtastung von Einzelsignalen als Beispiel für digitale aktive Ortsdosimetrie

Für die reine Funktionsweise als Dosimeter ist prinzipiell eine einfache analoge Integration, z. B auf einem Kondensator, des Ausgangssignals eines Lichtsensors, ausreichend.

Eine Digitalisierung in einem Abtastintervall, das der Aktualisierung des Anzeigeelements entspricht, wäre ausreichend. Die digitale Erfassung jeder Interaktion erfordert zunächst eine

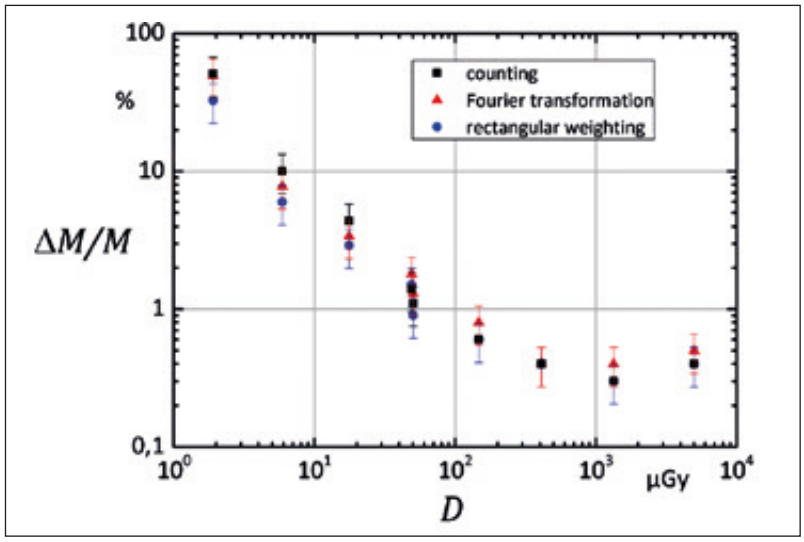

Abb. 2: Relative Unsicherheit einer einzelnen OSL-Messung in Abhängigkeit der Dosis. Gezeigt sind nicht nur die Auswertung durch einfache Zählung der optischen Photonen, sondern auch komplexere Auswerteverfahren, die bei periodischer Stimulation weitere Erkennung von Störeffekten zulassen [1].

Anzeige

TÜV SÜD
Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.

Strahlenschutz in Medizin, Forschung und Industrie

Tagung
6. – 7. Dezember 2022,
Leipzig

Ziel der Veranstaltung ist es über den Stand der Praxis des Strahlenschutzes und seiner Bewertung bei der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Medizin, Forschung und Industrie zu informieren.

Veranstaltungspreis
820,00 € zzgl. gesetzlicher USt.
460,00 € zzgl. USt. Für Vertreter von Aufsichts- und Genehmigungsbehörden

Veranstaltungsort
Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung – UFZ
Leipziger KUBUS
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

Anmeldung und Auskünfte
TÜV SÜD Akademie GmbH
Tagungen und Kongresse
Martina Sperber
Westendstr. 160
80339 München
Telefon +49 89 5791-2476
Telefax +49 89 5155-2468
E-Mail: congress@tuvsud.com

TÜV®

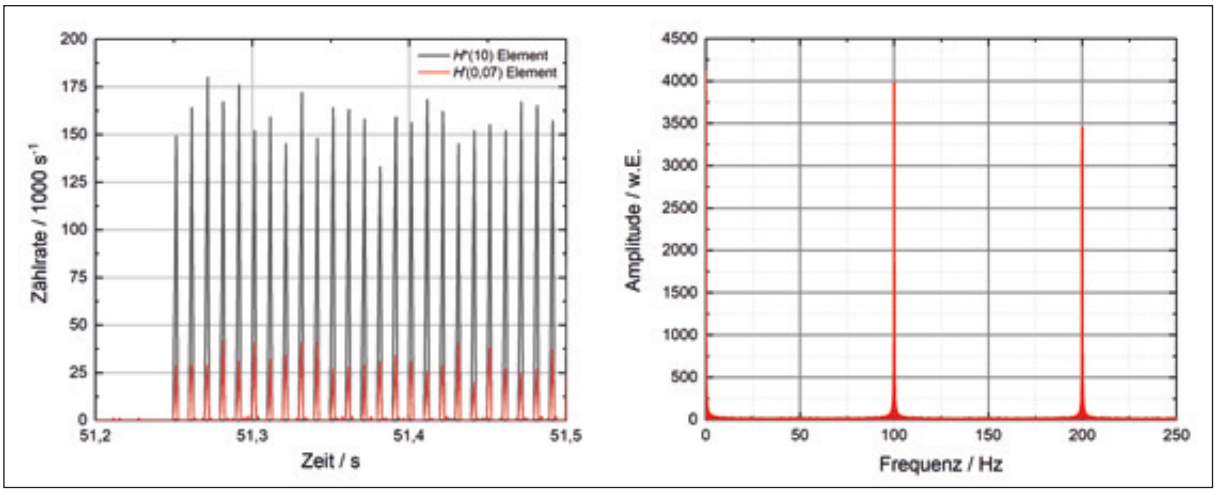

Abb. 3: Zählrate (links) und Fourieranalyse der Messdaten eines digitalen Ortsdosimeters in unterschiedlich gepulsten Strahlungsfeldern [3] an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Daten: T. Werner, TU Dresden).

Zeitliche Modulation des Strahlungsfeldes

Anpassung des Detektorsignals mittels eines analogen Vorfilters in seiner Zeitkonstante an die verwendete Abtastfrequenz, um das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu erfüllen – ein entscheidender Schritt in der digitalen Signalkette. Das hier diskutierte System [2] verwendet einen ADC mit einer Frequenz von 125 MHz und einer Auflösung von 16 Bit, wobei Filterzeiten von zweistelligen Nanosekundenbereichen ausreichend sind.

Ähnlich wie bei der OSL-Messung werden nun jedem einzelnen Ereignis ein Zeitstempel, ein Energiewert und weitere Parameter zugewiesen. Während die Energiewerte die Berechnung der Dosis samt ihrer Unsicherheit zulassen, erlaubt das Ensemble der Zeitstempel eine Analyse der Daten in Bezug auf eine eventuelle zeitliche Modulation des Strahlungsfeldes. Somit sind dosimetrische Geräte nach diesem Paradigma in der Lage, bei korrekter Umsetzung nicht nur in gepulsten Strahlungsfeldern korrekt zu messen, sondern ein Vorliegen von Pulsung auch festzustellen (Abb. 3) und sogar die zeitliche Struktur des Strahlungsfeldes zu analysieren. So ist beispielsweise eine Aussage über Betriebszeit und -modus eines klinischen Linearbeschleunigers auch außerhalb abschirmender Strukturen möglich. Korrekte Umsetzung in diesem Zusammenhang meint ein dosisproportionales Verhalten im Fall von zeitlich sehr nahen Ereignissen, was hier nicht weiter diskutiert wird.

Grenzen der Digitalisierbarkeit und Schlussbemerkung

Der Vorfilter im zweiten Beispiel bedingt einen „Verschliff", der ganz ähnlich wie die Akkumulation im BeO den in Stufen erfolgenden Charakter des Prozesses unwiederbringlich unzugänglich macht. Man entscheidet sich zwischen Teilaspekten des Prozesses, der digital erfasst werden soll. Mit endlichem Maschinentakt muss das Abtasttheorem erfüllt werden, wodurch dem Informationserhalt praktische Grenzen gesetzt sind.

Fazit

Es lohnt sich, die digitale Natur der Physik auch als solche zu erfassen. Mit der Hilfe aktueller integrierter Schaltkreise ergeben sich Blicke auf neue Aspekte des praktischen Strahlenschutzes.

Digitalisierung als Erfassung und Darstellung bisher unzugänglicher Daten hat hier ein enormes Potenzial. Jedoch erfordert sie auch Wissen und neue, statistische Werkzeuge, um diese zusätzliche Information interpretieren zu können.

Thomas Kormoll ❑

Haftungsausschluss

Die Inhalte dieser Zeitschrift werden von Verlag, Herausgeber und Autoren nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und zusammengestellt. Eine rechtliche Gewähr für die Richtigkeit der einzelnen Angaben kann jedoch nicht übernommen werden. Gleiches gilt auch für die Webseiten, auf die verwiesen wird. Es wird betont, dass wir keinerlei Einfluss auf die Inhalte und Formulierungen dieser Seiten haben und auch keine Verantwortung für sie übernehmen. Grundsätzlich gelten die Wortlaute der Gesetzestexte und Richtlinien sowie die einschlägige Rechtsprechung.